

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вторичное использование металлов позволяет сократить потребление природных ресурсов и снизить потребление электроэнергии. Так, на получение вторичного алюминия расходуется в 20 раз меньше энергии, чем на электролитическое получение его из криолит-глиноземных расплавов [1]. Одним из путей решения данных экономических и экологических проблем является развитие технологий сбора цветного металлолома и возвращения его в промышленное производство.

В настоящее время большую проблему представляет утилизация бытовой электротехники и электроники, производимой в колоссальных объемах при крайне малом сроке их жизни - 3 ÷ 5 лет. Как правило, эти устройства содержат в себе большое количество цветных металлов, преимущественно проводниковых, сплавов меди (Cu) и алюминия (Al). В этих устройствах цветные металлы присутствуют в виде контактных соединений, проводников обмоток электродвигателей, дорожек печатных плат, радиаторов силовых полупроводниковых ключей.

Одно из перспективных направлений переработки бытовой техники состоит в ее дроблении с последующим разделением неметаллов, черных и цветных металлов методами магнитной и электродинамической сепарации. При этом для надежного механического разделения различных материалов, зачастую требуется дробление с получением достаточно мелкой фракции – 1–5 мм.

Если методы магнитной сепарации (выделения из смесей черных металлов) не критичны к размеру извлекаемых частиц, то извлечение цветных металлов и их сортировка методами электродинамической сепарации наталкивается на определенные трудности при обработке мелких фракций. Указанное обстоятельство связано с физической основой работы электродинамических сепараторов.

По своему принципу действия электродинамические сепараторы относятся к классу индукционных машин, в которых электромеханическое преобразование энергии обусловлено силовым взаимодействием движущегося поля индуктора и индуцированными им токами во вторичном элементе (ВЭ) – проводящей извлекаемой частице.

Особенностью электродинамических сепараторов как электрических машин является крайне короткий (меньше пространственного периода магнитного поля индуктора 2τ) ВЭ длиной b

$$b < \tau . \quad (1)$$

Наличие продольных границ ВЭ, находящегося в зазоре линейной индукционной машины (ЛИМ), обуславливает возникновение в нем магнитного поверхностного эффекта, который оказывает значительное влияние на характеристики электродинамического сепаратора. Так, в [2] показано, что зависимости нормированного усилия извлечения $F_{X^*} = F_X / F_{XKP}$ (F_{XKP} – критическое усилие) от продольного размера ВЭ b имеют резко экстремальный характер (рис. 1), причем максимум усилия извлечения определяется следующим условием:

$$b \approx 2\Delta , \quad (2)$$

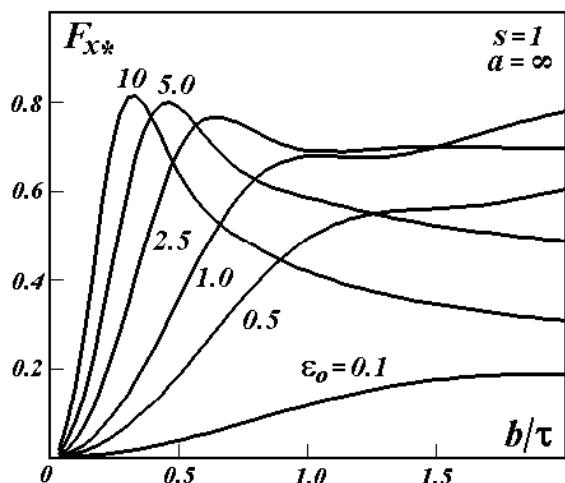


Рис. 1. Характеристики электродинамического сепаратора:

$$\epsilon_0 = \frac{2}{(\pi/\tau)^2} \times \frac{1}{\Delta^2}$$

Соотношение (2) объясняет известное практическое положение [2], что сепараторы промышленной частоты $f = 50$ Гц не позволяют надежно разделять смеси крупностью менее 40 мм. Действительно, величины глубины проникновения магнитного поля при промышленной частоте в медные и алюминиевые сплавы составляют $\Delta = 9 - 15$ мм ($2\Delta = 20 - 30$ мм), что достаточно близко к практическому критерию. Отметим, что условие (2) имеет вполне четкий физический смысл: при $b \ll 2\Delta$ ВЭ становится прозрачным для волны магнитного поля индуктора, и, следовательно, не способно захватывать ее энергию и преобразовывать в механическую.

Очевидно, для получения требуемых усилий извлечения мелких фракций ($d = 1 - 5$ мм) необходимо уменьшать глубину проникновения Δ , что возможно только увеличением частоты магнитного поля индуктора f .

Увеличение частоты по сравнению с промышленной возможно получить следующими путями [2]:

- применение вращающегося индуктора с постоянными магнитами;
- использование высокочастотного источника питания линейного (неподвижного) индуктора.

Оба способа имеют свои достоинства и недостатки, обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи. Однако общим для этих способов обстоятельством является обязательность (для линейных) или желательность (для вращающихся) наличия в них магнитопроводов из электротехнической стали.

Наличие магнитопроводов электродинамических сепараторов повышенной частоты ставит вопрос о ее предельно возможной величине, а в практическом отношении о минимальном размере сепарируемой смеси.

Такая постановка вопроса связана с тем, что увеличение частоты, с одной стороны, поднимает усилие извлечения для мелкой частицы (рис. 1), с другой, увеличивает потери в магнитопроводе, и тем самым, снижает магнитодвижущую силу (МДС) индуктора сепаратора. Последнее утверждение обоснуем, используя схему замещения индукционной машины – рис.2. При одинаковой линейной нагрузке (первичном токе I_1) величина реактивной составляющей тока холостого хода I_P будет снижаться при уменьшении R_0 – сопротивлении, соответствующем потерям в магнитопроводе. Снижение реактивной составляющей тока холостого хода соответствует уменьше-

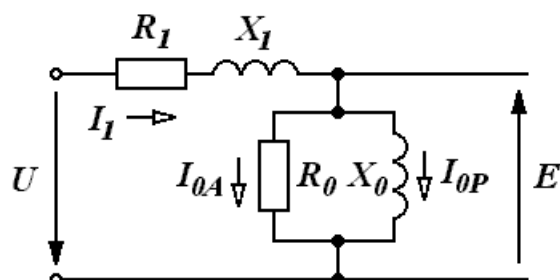


Рис. 2. Схема замещения индукционной машины

нию индукции магнитного поля в зазоре индукционной машины, и как следствие, уменьшению усилия извлечения.

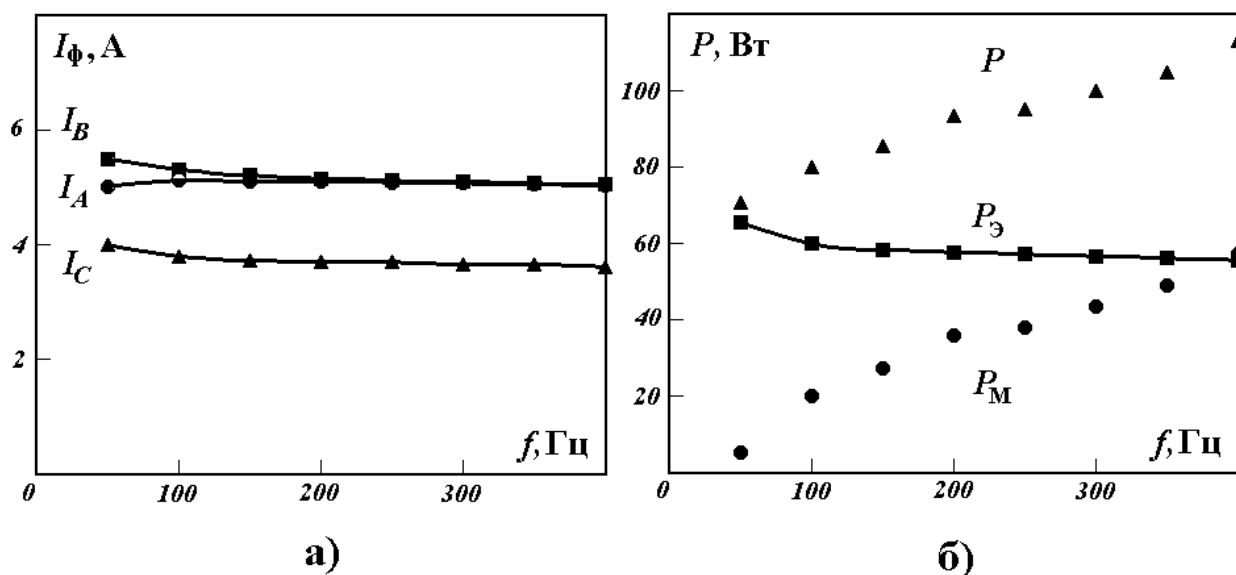


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований электродинамического сепаратора:

а – зависимости токов фаз индуктора от частоты; б – зависимости мощности индуктора P , потерь в меди P_3 и потерь в стали P_M от частоты

Таким образом, увеличение частоты магнитного поля в электродинамических сепараторах с магнитопроводами создает два противодействующих явления, увеличивающих и снижающих усилие извлечения, что предполагает наличие некоторой предельной частоты $f_{пр}$, превышение которой нецелесообразно. Отметим, что вопрос определения величины предельной частоты электродинамических сепараторов со стальными шихтованными магнитопроводами поднимался давно, например, в [3], тем не менее до сих пор не имеет четкого ответа. При этом многочисленные исследования, посвященные влиянию потерь в стали асинхронных машин, в том числе при частотном управлении, не могут быть непосредственно использованы в нашем случае ввиду значительно меньших значений индукции в магнитопроводах электродинамических сепараторов.

Частным ответом о целесообразности увеличения частоты магнитного поля в электродинамических сепараторах могут быть результаты экспериментальных исследований, в том числе приведенные ниже.

В качестве экспериментальной установки авторами использовались двухполюсный линейный индуктор с обратным магнитопроводом, питание которого осуществлялось от промышленного преобразователя частоты. Предельное значение частоты составляло 400 Гц. В отношении проявления потерь в стали магнитная система сепаратора представляла собой наихудший вариант, поскольку была выполнена из горячекатанной стали толщиной 0,5 мм. из очень старого железа, с фрезерованными пазами индуктора и стальными нажимными щеками толщиной 5 мм.

Первый этап экспериментальных исследований проводился на индукторе сепаратора без ВЭ. При этом частота питания изменялась от 50 до 400 Гц при практически неизменной линейной нагрузке индуктора (рис. 3а). Для измерения токов, напряжений использовались приборы электромагнитной системы, мощностей – электродинамической. Измеренная активная мощность P далее разделялась на потери в обмотке индуктора P_3 и потери в стали P_M (рис. 3б).

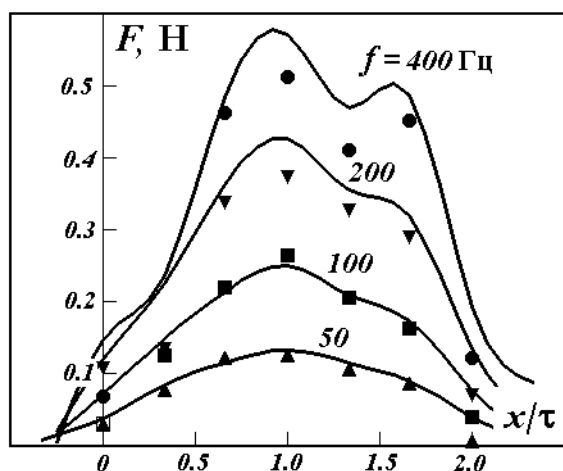


Рис. 4. Расчетные и измеренные значения усилия извлечения в различных зонах индуктора сепаратора

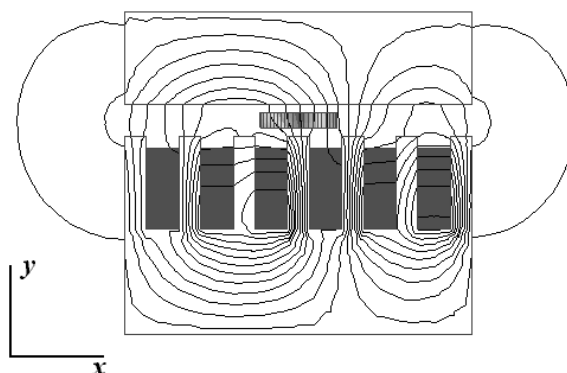


Рис. 5. Расчетная картина поля

Следующая серия экспериментов состояла в определении усилия, действующего на ВЭ (усилия) извлечения. В качестве ВЭ использовалась квадратная алюминиевая пластина с размерами длина – 25 мм, ширина – 25 мм, толщина – 5 мм. При величине полюсного деления индуктора 52,5 мм относительная длина такого ВЭ составляла $b/\tau = 0.48$. Величина усилия измерялась для нескольких положений ВЭ в зазоре индуктора. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 4 и обозначены точками. Для сравнения на этом же графике приведены расчетные распределения усилий (сплошные линии), полученные без учета потерь в стали. Эти расчеты проводились методом конечных элементов [4] (расчетная область показана на рис. 5). Как следует из эксперимента, результаты которого приведены на рис. 4, увеличение частоты позволяет существенно увеличить усилие извлечения. В тоже время, с увеличением частоты расхождение между расчетными и экспериментальными данными становится все более заметными. Отметим, что такое снижение реального усилия нельзя однозначно отнести к возникновению магнитных потерь, поскольку при проведении экспериментов было обнаружено существенное влияние частоты на температуру ВЭ.

Список использованных источников

1. Лебедев В. А. Экология и экономика электрометаллургии алюминия // Расплавы. 1993. № 1. С. 64 – 68.
2. Коняев А. Ю., Коняев И. А., Назаров С. Л. Влияние поверхностного эффекта на характеристики электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем // Электричество. 2013. № 11. С. 26 – 30.
3. Ширшов Б.П., Коняев А.Ю., Назаров С.Л., Смагин К.Ю. Влияние частоты на характеристики электродинамического сепаратора с линейным асинхронным двигателем. // Исследование параметров и характеристик электрических машин переменного тока. межвуз. научн. сб. - Свердловск: Изд. УПИ, 1983. С. 119 – 122.
4. Назаров С. Л., Абдуллаев Ж. О., Батенев А. О. Экспериментальная оценка простых методов расчета электромагнитного ядра электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем. // Актуальные проблемы энергосберегающих технологий. АПЭЭТ-2014: сб. научн. трудов. Екатеринбург: УрФУ. 2014. С. 207 – 210.